

論文の内容の要旨

論文題目	Link Weight Optimization Models against Link Failure in Internet Protocol Networks (インターネットプロトコルネットワークにおけるリンク故障に対するリンク重み最適化モデル)
学位 申請者	Kaptchouang Stephane (カプチュォアン ステファン)

本論文は、Internet Protocol (IP)ネットワークにおける故障対策のためのリンク重み最適化モデルを提案している。IPネットワークでは、トラヒックの経路はネットワーク事業者によって設定されるリンク重みで制御される。それらの重みを適切に決めることにより、ネットワーク内のトラヒックを分散させて混雑を抑えることができる。

第1章では、本研究の背景ならびに目的を述べ、本論文の構成を示す。

第2章では、従来のリンク重み最適化モデルについて述べる。従来のstart-time optimization (S0) では、ネットワークの運用を開始する前に正常時の混雑率を最小化するためのリンク重みを決定していた。しかし、S0はリンク故障を考慮していないため故障の際に混雑率が上昇し、パケットロスなどが発生する恐れがある。対策として、故障が発生する度にリンク重みを最適化することが考えられるが、リンク重みを変更する最中に通信を正常に行うことができないデメリットがある。この理由からリンク重みを予防的に設定するpreventive start-time optimization (PS0) が示された。PS0はいくつかのバリエーションがあるが、その中で単一故障に着目した上であらゆる故障パターンを予め考慮し、故障時の最悪の混雑率を最小化するためのリンク重みを決定する方式がある。このPS0では最悪の混雑率は改善されるものの、故障でない時にS0の混雑率に比べて大きな値を示しており、ペナルティが存在している問題点を指摘する。

第3章では、リンク重みを変更させずにペナルティと故障時の最悪の混雑率を削減するリンク重みの最適化モデル (penalty-aware model, PA model) を提案する。このPA modelに関して2つの方式であるPS0-NP (Preventive start-time optimization with no penalty) とS-PS0 (strengthened preventive start-time optimization)を述べている。PS0-NPはS0の混雑率の最適値を保証しつつ故障時の最悪混雑を軽減する方式である。実は、正常時のネットワークに対して、S0では、最適なリンク重みの最適解が複数存在おり、一番最初に見つけた解が選択される。PS0-NPでは、S0のすべての最適解を集めて、最悪の故障の下で最も性能の良い解を選ぶ考え方を採用している。これにより、S0の混雑率の最適値は保証され、

故障時でもS0より混雑が軽減される。これに対して、S-PS0は最悪混雑時にPS0の最適値を保証しつつ、正常時の混雑、つまりペナルティを低減する方式である。S-PS0は、PS0の複数の解の中から正常時に最も性能の良い解を選択する。両方式の性能評価を行ったところ、多くのネットワークではペナルティと最悪の混雑率を同時に減らすことを示す。

第4章では、Generalized preventive-aware start-time optimization (GPA) において、GPS0 (General Preventive Start-time Optimization) 方式を導入する。PS0-NPとS-PS0は、それぞれS0とPS0の解から適切な解を選択するが、解が1つしか存在しない場合、改善が見込めない。そのために、正常時は最適値にこだわらずに、最適値に近い値を固定して故障時の混雑を最小化できるリンク重みを探索することが望ましい。GPS0は、ネットワーク管理者が負担できるペナルティを設定して、そのペナルティを保証しながら最悪の混雑率を最も軽減できるリンク重みを探索する方式である。GPS0方式のポリシーは、(i) ゼロペナルティを設定すれば、PS0-NP方式と同じ結果にならないといけない、(ii) ペナルティを無視するとS-PS0と一致しなければならない、である。GPS0の性能をシミュレーションで行った結果、扱ったネットワークにおいて、正常時の最小混雑に比べて0.1%高い混雑が負担できるならば、最悪の混雑を最小化するリンクコストセットを求めることを示す。

第5章では、ペナルティを低減して正常時及び故障時にサポート可能な混雑を常に維持できるモデルを扱う。サポート可能な混雑を故障時においても維持するためにはリンクを補強する方法があり、この方法では故障が発生するとバックアップリンクへ切り替えて対応する。全てのリンクを補強することは高コストになるため、補強本数をなるべく削減することが要求されている。前述のようにIPネットワークではリンク重みはトラフィック経路を決定する。また、トラフィック経路に属するリンクが補強されるべきであるためリンク重みは補強リンクを決定することになる。つまり、リンク重みは補強箇所及び本数を決定することといえる。従来の研究では、補強本数を削減することを目的としたリンク最適化の仕組みは存在していないため、リンク重み及びリンク補強を組み合わせることで補強本数を減らしつつ補強箇所を示すモデル (link duplication model, LD model) を提案する。このリンク補強モデルは、PS0を利用する。PS0は最悪の混雑率を最小化する際にその原因であるリンク故障を特定しているため、最悪の混雑率がサポート可能な混雑率を上回る限り、当該リンクを補強する。また、補強済みリンクを除きながら、PS0の適用を繰り返す。性能評価において、半分のリンクを補強すればS0の最適値と同等の混雑率を故障時でも維持できることを確認する。

第6章では、PAとLDの両モデルを比較する。リンク補強を考慮するLD modelはリソース追加を想定しているため平等な比較を行うためにはリソース追加を考慮したPAモデルを導入する必要がある。そのためリソース追加を考慮したPAモデルを定式化し比較した。その結果、ネットワークの特徴、遅延要件、トラフィックの連続性の観点において適切なモデルを選ぶべきであることを示す。

第7章では、本論文の結論と今後の課題について述べる。

本論文で得られた成果は、IPネットワークにおける故障対策のためのリンク重み最適化モデルを示すものであり、今後の高信頼なアプリケーションを転送するネットワークの設計・制御において、要素技術となり得る。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 KAPTCHOUANG STEPHANE

審査委員主査 大木 英司

委員 來住 直人

委員 山尾 泰

委員 寺田 実

委員 KITSUWAN NATTAPONG

本論文は、Internet Protocol (IP)ネットワークにおける故障対策のためのリンク重み最適化モデルを提案している。IPネットワークでは、トラヒックの経路はネットワーク事業者によって設定されるリンク重みで制御される。それらの重みを適切に決めることにより、ネットワーク内のトラヒックを分散させて混雑を抑えることができる。

第1章では、本研究の背景ならびに目的を述べ、本論文の構成を示している。

第2章では、従来のリンク重み最適化モデルについて述べている。従来の start-time optimization (S0) では、ネットワークの運用を開始する前に正常時の混雑率を最小化するためのリンク重みを決定していた。しかし、S0はリンク故障を考慮していないため故障の際に混雑率が上昇し、パケットロスなどが発生する恐れがある。対策として、故障が発生する度にリンク重みを最適化することが考えられるが、リンク重みを変更する最中に通信を正常に行うことができないデメリットがある。この理由からリンク重みを予防的に設定する preventive start-time optimization (PS0) が示された。PS0はいくつかのバリエーションがあるが、その中で単一故障に着目した上であらゆる故障パターンを予め考慮し、故障時の最悪の混雑率を最小化するためのリンク重みを決定する方式がある。このPS0では最悪の混雑率は改善されるものの、故障でない時にS0の混雑率に比べて大きな値を示しており、ペナルティが存在している問題点を指摘している。

第3章では、リンク重みを変更させずにペナルティと故障時の最悪の混雑率を削減するリンク重みの最適化モデル (penalty-aware model, PA model) を提案している。このPA modelに関して2つの方式であるPS0-NP (Preventive start-time optimization with no penalty) とS-PS0 (strengthened preventive start-time optimization)を述べている。PS0-NPはS0の混雑率の最適値を保証しつつ故障時の最悪混雑を軽減する方式である。実は、正常時のネットワークに対して、S0では、最適なリンク重みの最適解が複数存在しており、一番最初に見つけた解が選択される。PS0-NPでは、S0のすべての最適解を集めて、最悪の故障の下で最も性能の良い解を選ぶ考え方を採用する。これにより、S0の混雑率の最適値は保証され、

故障時でもS0より混雑が軽減される。これに対して、S-PS0は最悪混雑時にPS0の最適値を保証しつつ、正常時の混雑、つまりペナルティを低減する方式である。S-PS0は、PS0の複数の解の中から正常時に最も性能の良い解を選択する。両方式の性能評価を行ったところ、多くのネットワークではペナルティと最悪の混雑率を同時に減らすことが示された。

第4章では、Generalized preventive-aware start-time optimization (GPA) において、GPS0 (General Preventive Start-time Optimization)方式を導入している。PS0-NPとS-PS0は、それぞれS0とPS0の解から適切な解を選択するが、解が1つしか存在しない場合、改善が見込めない。そのために、正常時は最適値にこだわらずに、最適値に近い値を固定して故障時の混雑を最小化できるリンク重みを探索することが望ましい。GPS0は、ネットワーク管理者が負担できるペナルティを設定して、そのペナルティを保証しながら最悪の混雑率を最も軽減できるリンク重みを探索する方式である。GPS0方式のポリシーは、(i) ゼロペナルティを設定すれば、PS0-NP方式と同じ結果にならないといけない、(ii) ペナルティを無視するとS-PS0と一致しなければならない、である。GPS0の性能をシミュレーションで行った結果、扱ったネットワークにおいて、正常時の最小混雑に比べて0.1%高い混雑が負担できるならば、最悪の混雑を最小化するリンクコストセットを求めることを示した。

第5章では、ペナルティを低減して正常時及び故障時にサポート可能な混雑を常に維持できるモデルを扱っている。サポート可能な混雑を故障時においても維持するためにはリンクを補強する方法があり、この方法では故障が発生するとバックアップリンクへ切り替えて対応する。全てのリンクを補強することは高コストになるため、補強本数をなるべく削減することが要求されている。前述のようにIPネットワークではリンク重みはトラヒック経路を決定する。また、トラヒック経路に属するリンクが補強されるべきであるためリンク重みは補強リンクを決定することになる。つまり、リンク重みは補強箇所及び本数を決定することになる。従来の研究では、補強本数を削減することを目的としたリンク最適化の仕組みは存在していないため、リンク重み及びリンク補強を組み合わせることで補強本数を減らしつつ補強箇所を示すモデル (link duplication model, LD model) を提案している。このリンク補強モデルは、PS0を利用する。PS0は最悪の混雑率を最小化する際にその原因であるリンク故障を特定しているため、最悪の混雑率がサポート可能な混雑率を上回る限り、当該リンクを補強する。また、補強済みリンクを除きながら、PS0の適用を繰り返す。性能評価において、半分のリンクを補強すればS0の最適値と同等の混雑率を故障時でも維持できることを確認している。

第6章では、PAとLDの両モデルを比較している。リンク補強を考慮するLD modelはリソース追加を想定しているため平等な比較を行うためにはリソース追加を考慮したPAモデルを導入する必要がある。そのためリソース追加を考慮したPAモデルを定式化し比較した。その結果、ネットワークの特徴、遅延要件、トラヒックの連続性の観点において適切なモデルを選ぶべきであることを示している。

第7章では、本論文の結論と今後の課題について述べている。

本論文で得られた成果は、IPネットワークにおける故障対策のためのリンク重み最適化モデルを示すものであり、今後の高信頼なアプリケーションを転送するネットワークの設計・制御において、要素技術となり得る。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。